Transistoren instellen

Onder het instellen van een bipolaire transistor verstaat men het op bepaalde waarden vastleggen van de gelijkstromen die door de transistor vloeien bij afwezigheid van een wisselspanningssignaal aan de ingang. U kunt dit op diverse manieren doen die ieder hun voor- en nadelen hebben.

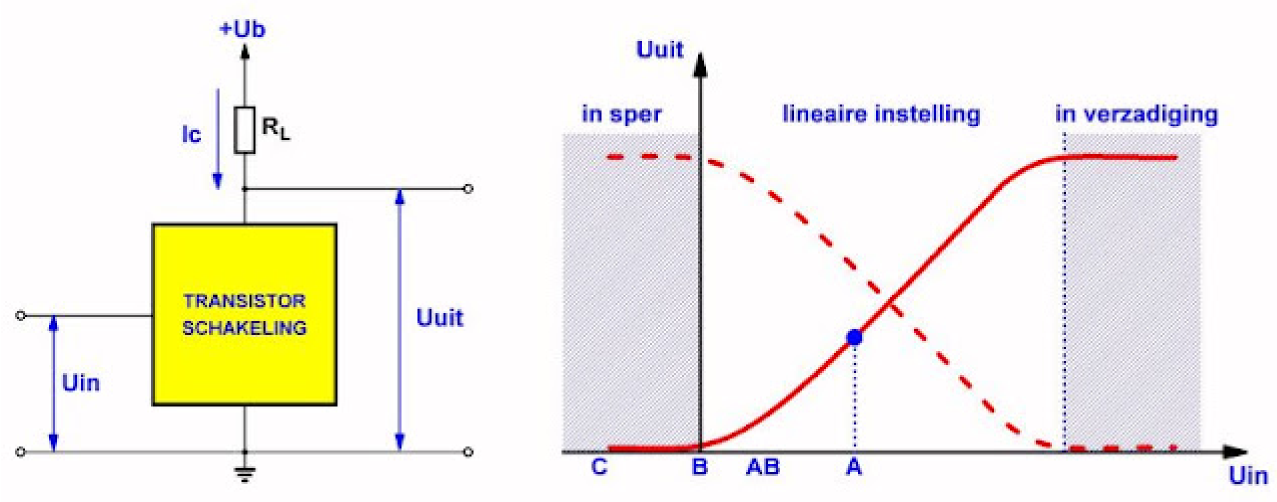
Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 15-11-2019

Begrippen en definities

Wat is de instelling van een bipolaire transistor?
Door het instellen van een transistortrap legt u de waarden vast van:
- De basisstroom.
- De collectorstroom.
- De emitterstroom.

In de meeste gevallen gebeurt dit door het berekenen van weerstanden in de basis-, collector- en emitterkringen en door het nadien aansluiten van die weerstanden op de voedingsspanning. Hierdoor gaat de bipolaire transistor zich, als gevolg van zijn natuurkundig gedrag, gedragen als een variabele weerstand, waardoor de gewenste stromen gaan vloeien.

Het algemene principe van instelling
Het algemene principe voor het instellen van een bipolaire transistor is getekend in de onderstaande figuur. De transistor en de meeste instellingsonderdelen zijn voorgesteld door het blokje. Dit staat in serie met de belastingsweerstand R_L die tussen de collector en de voeding is geschakeld. Het gevolg is dat er een instelstroom I_c gaat vloeien door de serieschakeling van de weerstand R_L en de transistor. Met noemt deze instelstroom ook wel de *'ruststroom'*.
Het gevolg van de stroom I_c is dat er over de weerstand R_L en de transistor spanningen vallen. De spanning op het knooppunt van beide onderdelen noemt men de uitgangsspanning U_{uit}. In de rechter grafiek van de figuur is het verband tussen de instelstroom I_c, de uitgangsspanning U_{uit} en de ingangsspanning U_{in} getekend.
Het verband tussen stroom en spanning wordt gegeven door de volle lijn, de verhouding tussen de twee spanningen door de onderbroken lijn. Als de spanning U_{in} kleiner is dan een bepaalde waarde zal er geen stroom door de schakeling vloeien. De schakeling gedraagt zich dan als een onderbreking. Dit is weergegeven door het linker gearceerde gebied. De uitgangsspanning is dan maximaal en gelijk aan de waarde van de voedingsspanning. Men zegt dat de transistor *'in sper'* is ingesteld. Als de ingangsspanning groter wordt dan een bepaalde waarde zal de instelstroom I_c gelijk worden aan de maximale waarde die door de schakeling kan vloeien. Deze waarde is gelijk aan $+U_b$ / R_L, de voedingsspanning gedeeld door de belastingsweerstand. Op dat moment is de uitgangsspanning gelijk aan nul en de transistor gedraagt zich als een kortsluiting. Dit wordt voorgesteld door het rechter gearceerde gebied in de grafiek. Men zegt dat de transistor *'in verzadiging'* is ingesteld.



De algemene voorstelling van het instellen van een bipolaire transistor.
(© 2019 Jos Verstraten)

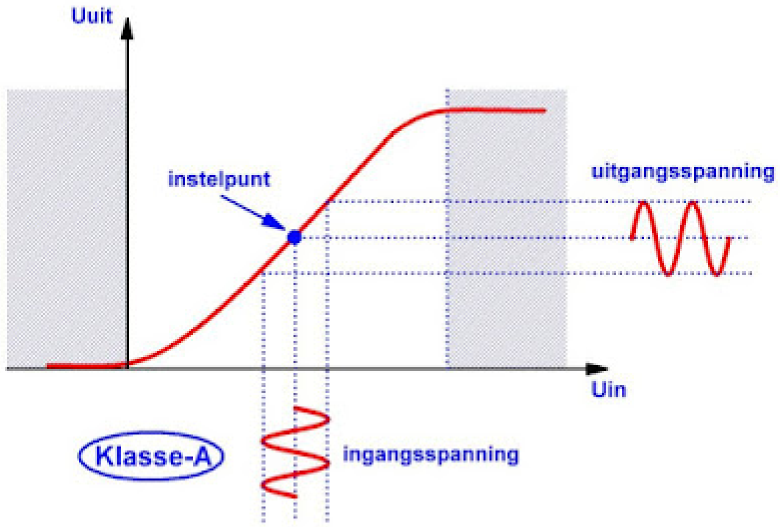
Het werkingsgebied
Als een transistor werkt, dus als een ingangssignaal aanwezig is, dan zal dit ingangssignaal er voor zorgen dat de instelspanning U_{uit} groter en kleiner wordt. De waarde van deze spanning loopt dus als het ware heen en weer over de horizontale as van de grafiek van de bovenstaande grafiek. Ook de stroom I_c zal als gevolg van deze modulatie groter en kleiner worden. Er zijn twee basissystemen die bepalen in welk werkingsgebied de stroom zal vloeien.

- **Digitale instelling**
  Als een transistor als digitaal element moet werken, dan moet u ervoor zorgen dat de halfgeleider alleen in de gearceerde gebieden wordt ingesteld. De stroom is dan maximaal of nul. De uitgangsspanning wordt bijgevolg nul, hetgeen digitaal overeen komt met 'L', of maximaal, hetgeen digitaal overeen komt met 'H'.
- **Lineaire instelling**
  Als een transistor als versterker moet werken, moet u er voor zorgen dat de halfgeleider tussen de gearceerde gebieden wordt ingesteld. De stroom mag nooit in een van de gearceerde gebieden terecht komen. De transistor werkt dan als variabele weerstand en dank zij deze werking zal er een uitgangsspanning verschijnen die evenredig is met de ingangsspanning.

Instellingsklassen
Internationaal is een lettercodering afgesproken die omschrijft in welk gebied een bipolaire transistor is ingesteld. Deze codering is ook weergegeven in de bovenstaande grafiek. Men onderscheidt de instellingen:

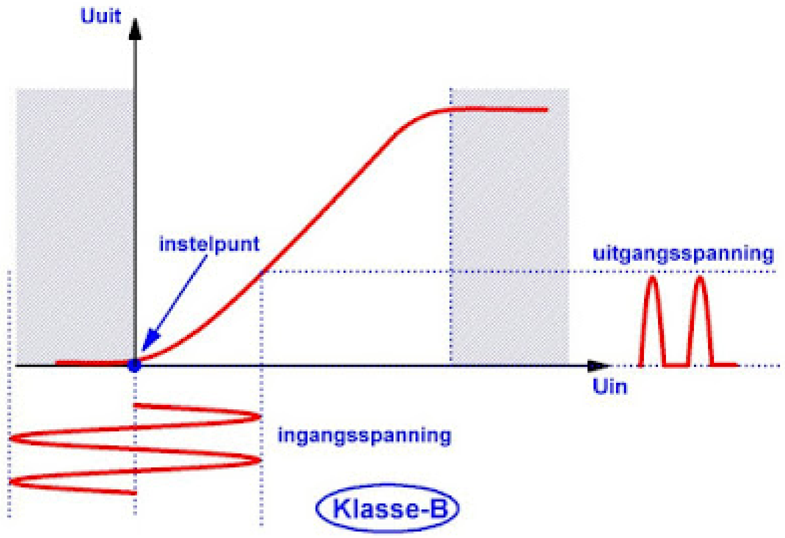
- Klasse A.
- Klasse B.
- Klasse AB.
- Klasse C.
- Klasse D.

Klasse-A instelling
Bij deze instelling werkt de transistor volledig in het niet-gearceerde deel van de grafiek. De transistor werkt dus steeds als variabele weerstand. Het instelpunt A ligt in het midden van het niet-gearceerde gebied. Een dergelijke instelling is de standaard instelling voor voorversterkers, toonregelingen, mengers en dergelijke. Deze instelling is schematisch weergegeven in de onderstaande figuur.



De klasse-A instelling van een bipolaire transistor. (© 2019 Jos Verstraten)

Klasse-B instelling
Bij deze instelling wordt de transistor zo ingesteld dat de instelstroom precies nul is. Het instelpunt B ligt precies daar waar de transistor overgaat naar sper. Deze instelling wordt vaak gebruikt bij eindversterkers, waarbij twee transistoren op een speciale manier geschakeld zijn zodat iedere halfgeleider slechts één helft van het signaal voor zijn rekening neemt. Deze instelling is schematisch voorgesteld in de onderstaande figuur.



De klasse-B instelling van een bipolaire transistor. (© 2019 Jos Verstraten)

Klasse-AB instelling
Deze instelling ligt tussen de instelpunten A en B. In rust vloeit er een vrij kleine instelstroom door de transistor. Maar als u een signaal superponeert op de ruststroom, dan zal de transistor soms in sper terecht komen. Ook deze instelling wordt vaak toegepast bij eindversterkers.

Klasse-C instelling
Bij deze instelling wordt de transistor volledig in het spergebied ingesteld. Als u de ruststroom met een klein signaal moduleert zal de transistor nog steeds in sper blijven. Alleen als u de ruststroom moduleert met een zeer groot signaal zullen de positieve pieken van deze stroom de transistor in geleiding brengen. Het instelpunt C ligt dus helemaal in de linker gearceerde zone. Deze instelling wordt vaak toegepast bij HF-versterkers, waarbij de bij deze instelling horende grote signaalvervorming van geen belang is.

Klasse-D instelling
Dit noemt men wel eens de *'digitale instelling'* van een transistor. In deze klasse is er geen

ruststroom aanwezig en heeft de signaalstroom slechts twee waarden. Deze zorgen ervoor dat de transistor ofwel in sper ofwel in verzadiging wordt gestuurd. De uitgangsspanning is dus ofwel nul, ofwel maximaal, hetgeen overeen komt met de digitale signalen 'L' en 'H'. Deze instelling wordt bijvoorbeeld toegepast bij digitale eindversterkers, waar het geluidssignaal onder digitale vorm wordt aangeboden en onder digitale vorm naar de luidspreker gaat. Tussen de uitgang van de versterker en de luidspreker is een laagdoorlaat filter geschakeld dat er voor zorgt dat de digitale signalen weer in een analoog signaal worden omgezet.

Basisschakelingen van bipolaire transistoren

Inleiding

Als men over een transistortrap praat neemt men vaak als vanzelfsprekend aan dat het ingangssignaal op de basis wordt aangesloten en dat het uitgangssignaal van de collector wordt afgenomen. Dat is inderdaad de meest toegepaste schakeling. Maar u kunt een transistor in drie verschillende basisschakelingen instellen:

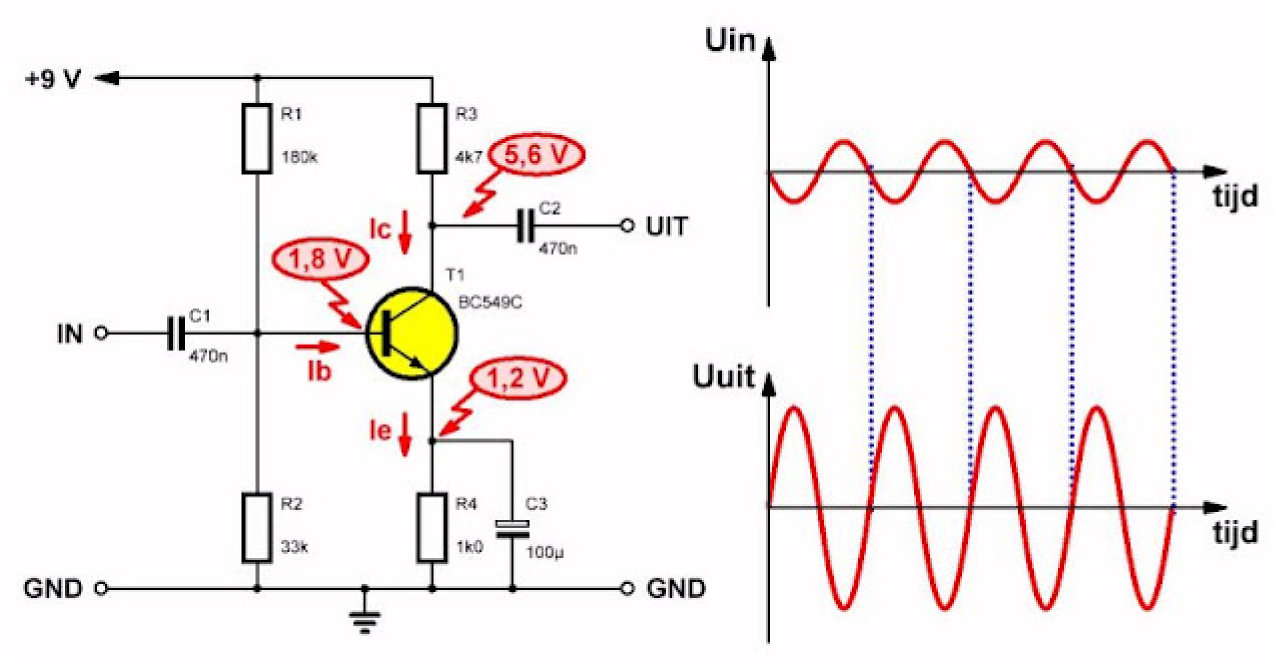
- Geaarde emitter schakeling.
- Geaarde basis schakeling.
- Geaarde collector schakeling.

Deze drie schakelingen hebben ieder hun specifieke toepassingen en eigenschappen.

De geaarde emitter schakeling

Het schema

Dit is, zie de onderstaande figuur, de meest toegepaste schakeling voor het instellen van een transistor. De emitter ligt via een weerstand R4 en een condensator C2 aan de massa. De grote condensator vormt een kortsluiting voor wisselspanningen en zorgt ervoor dat de emitter voor het signaal aan de massa ligt. De grote elco heeft immers een impedantie (wisselstroom weerstand) die voor gelijkspanning vrijwel oneindig hoog is en voor wisselspanning vrijwel nul. Vandaar de naam *'geaarde emitter schakeling'*. De basis wordt ingesteld door middel van een weerstandsdeler R1 en R2. Deze weerstandsdeler bepaalt de spanning op de basis en daarmee de ruststroom I_c door de transistor. De collector is via de belastingsweerstand R3 aangesloten op de positieve voedingsspanning.
U moet de twee weerstanden naar de basis experimenteel zó kiezen dat er in rust ongeveer de helft van de voedingsspanning op de collector staat.
Het ingangssignaal wordt via de scheidingscondensator C1 aangeboden aan de basis. Het wisselspanningssignaal aan de ingang moduleert de instelspanning van de basis en daarmee ook de basisstroom. Deze stroomvariaties worden versterkt door de transistor, met als gevolg dat ook de ruststroom I_c gaat variëren. Deze variërende stroom heeft de signaal uitgangsspanning op de collector tot gevolg.



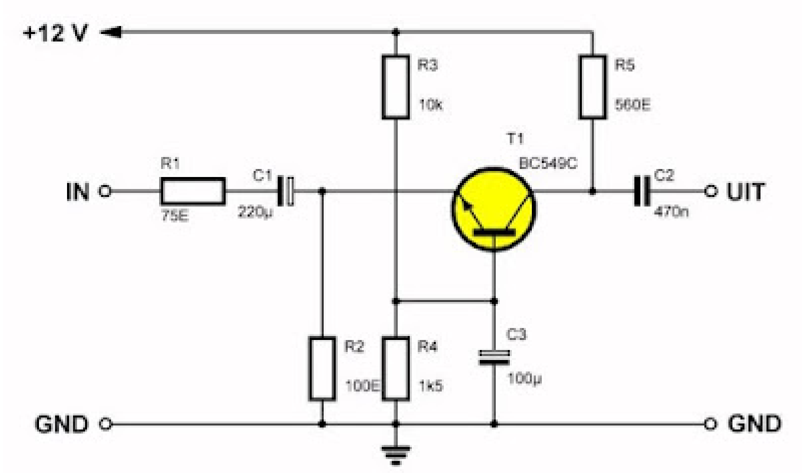
De geaarde emitter schakeling is de meest bekende transistor instelling.
(© 2019 Jos Verstraten)

Eigenschappen van de geaarde emitter schakeling
Met de geaarde emitter schakeling kunt u spanningsversterkingen van 50 tot 2.000 met één trap realiseren. Omdat de schakeling zowel de ingangsstroom als de ingangsspanning versterkt, heeft de schakeling een grote vermogensversterking. De schakeling werkt inverterend. Een verhoging van de basisstroom, door een positief signaal op de ingang, heeft een verhoging van de collectorstroom tot gevolg. Hierdoor gaat echter de spanning op de collector dalen. Het verband tussen het signaal op de ingang en het signaal op de uitgang is getekend in de grafiek van de bovenstaande figuur. Een positieve halve periode aan de ingang heeft dus een negatieve halve periode aan de uitgang tot gevolg.
De ingangsimpedantie van de schakeling wordt voornamelijk bepaald door de parallelle vervangingswaarde van de twee weerstanden in de basis. In de meeste gevallen zal deze impedantie dus niet erg hoog zijn. In het getekende voorbeeld is de ingangsimpedantie in ieder geval lager dan 33 kΩ. Vandaar dat de scheidingscondensator C1 aan de ingang een vrij hoge waarde moet hebben. Als u deze condensator een te kleine waarde geeft zal de impedantie (wisselstroom weerstand) van de condensator voor wisselspanningen een spanningsdeler vormen met de basisweerstanden. Hierdoor zullen signalen met lage frequenties verzwakt worden.
De bandbreedte van de geaarde emitter schakeling is vrij laag. Dit komt door de funeste invloeden van de parasitaire capaciteiten in de transistor op de hoogfrequente werking van de schakeling (zie later). Vandaar dat u de geaarde emitter schakeling hoofdzakelijk in laagfrequente schakelingen zult aantreffen, zoals audio-voorversterkers, toonregelingen, mengschakelingen, etc.

De geaarde basis schakeling

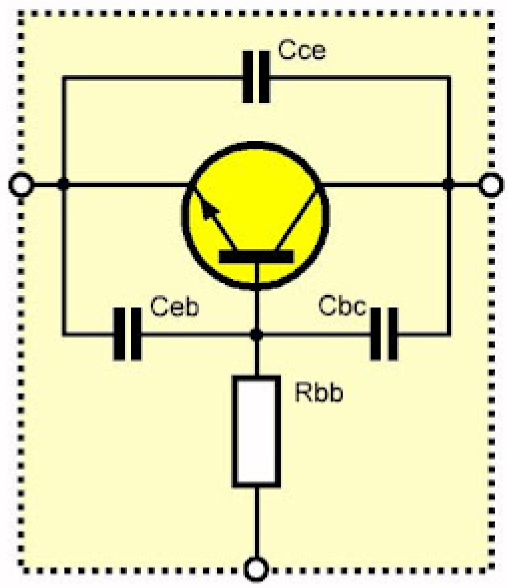
Het schema
Bij de geaarde basis schakeling ligt de basis op wisselspanningsgebied aan de massa. Zoals uit de onderstaande figuur blijkt, wordt dit gerealiseerd door de basis door middel van een grote condensator C3 rechtstreeks met de massa te verbinden. De basis wordt ingesteld door de spanningsdeler R3 en R4. Het ingangssignaal wordt nu op de emitter aangeboden via de scheidingscondensator C1 en de serieweerstand R1. Het uitgangssignaal wordt van de collector afgenomen. Ook nu staat de belastingsweerstand R5 in serie met de collector. Uiteraard moet de emitter via een weerstand R2 met de massa worden verbonden. Zonder

deze R2 zou er geen stroom door de halfgeleider kunnen vloeien.



De geaarde basis schakeling. (© 2019 Jos Verstraten)

Over parasitaire capaciteiten
U kunt zich de vraag stellen wat het voordeel van de geaarde basis schakeling is. Dit voordeel uit zich voornamelijk bij hoge frequenties. Iedere transistor heeft parasitaire capaciteiten tussen zijn drie aansluitpennen, zie de onderstaande figuur. Tussen de basisaansluiting en de capaciteit tussen de basis en de emitter (C_{eb}) staat echter de interne basisweerstand R_{bb}. In de geaarde emitter schakeling vormen deze twee onderdelen een laagdoorlaat filter, dat hoge frequenties verzwakt. Vandaar dat de bandbreedte van de geaarde emitter schakeling beperkt is. In de geaarde basis schakeling ziet dit er heel anders uit. Zoals uit de figuur blijkt staan R_{bb} en C_{eb} nu omgekeerd geschakeld tussen de ingang en de massa. Het gevolg is dat dit netwerkje nu geen laagdoorlaat filter vormt, maar een hoogdoorlaat filter. De parasitaire capaciteit zal de hoge signaalfrequenties niet verzwakken, maar zelfs iets versterken.



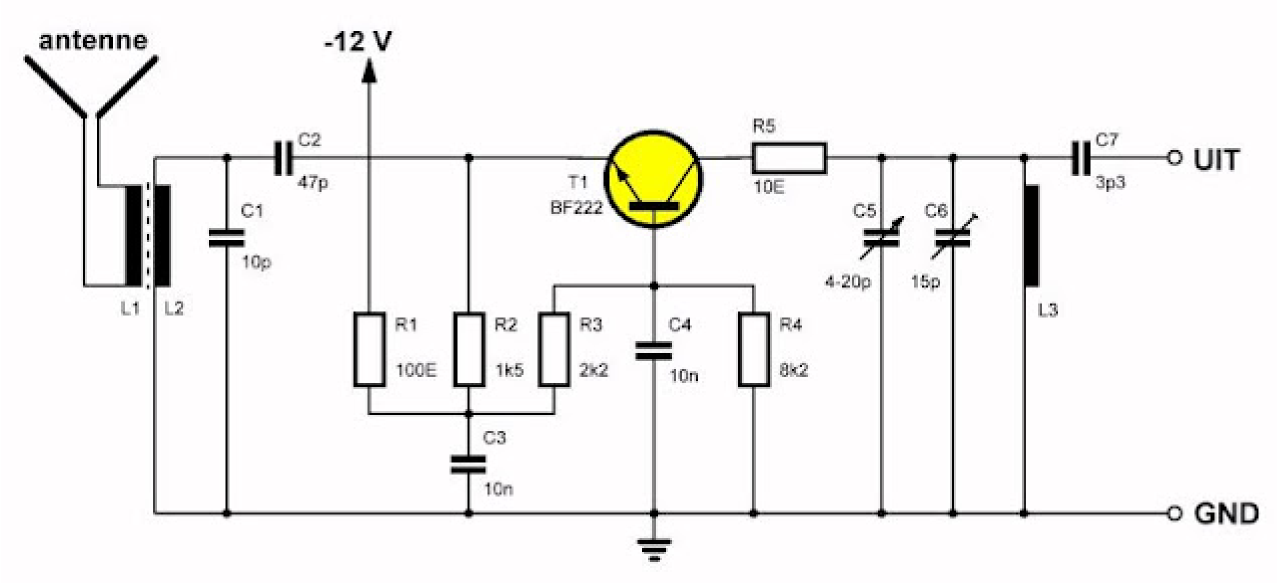
De plaats van de parasitaire onderdelen C_{eb} en R_{bb} in de geaarde basis schakeling. (© 2019 Jos Verstraten)

Eigenschappen van de geaarde basis schakeling
Zoals blijkt uit het schema heeft een geaarde basis schakeling een zeer lage ingangsimpedantie. Tussen de ingang en de massa staat immers slechts een weerstand R1 + R2 = 175 Ω. U moet dus de waarde van de scheidingscondensator C1 heel erg groot maken om verzwakking van de lage frequenties te voorkomen. Vandaar dat hiervoor een forse elco noodzakelijk is. De uitgangsimpedantie van de schakeling is echter zeer groot. De geaarde

basis schakeling werkt niet inverterend. Als het ingangssignaal stijgt, zal ook de uitgangsspanning stijgen.
In vergelijking met de bandbreedte B_E van de geaarde emitter schakeling is de bandbreedte B_B van de geaarde basis schakeling gelijk aan:
$B_B = B_E \bullet ß$
Hierin staat ß voor de stroomversterking van de transistor. Het zal dus duidelijk zijn dat de versterking van een geaarde basis schakeling constant blijft tot zeer hoge signaalfrequenties. Vandaar dat u de geaarde basis schakeling vaak in HF-schakelingen zult aantreffen. Hierbij levert bovendien de zeer lage ingangsimpedantie nauwelijks nadelen op. Integendeel, vaak kunt u handig gebruik maken van deze lage impedantie om de ingang van de geaarde basis schakeling op de juiste manier aan te sluiten op een kabel met een lage eigen impedantie van bijvoorbeeld 50 Ω of 75 Ω.

Het Miller-effect
Een tweede aspect dat bij de HF-versterking een rol speelt is het zogenoemde *'Miller-effect'*. Tussen de basis en de collector staat een parasitaire capaciteit C_{bc}. In de geaarde emitter schakeling staat deze capaciteit tussen de uitgang en de ingang geschakeld. Deze capaciteit vormt dus een terugkoppeling van de uitgang naar de ingang bij de inverterende werking van de geaarde emitter schakeling. Nu kunt u wiskundig aantonen dat onder dergelijke omstandigheden deze capaciteit terug te vinden is op de ingang van de versterker en wel vermenigvuldigd met de spanningsversterking van de transistor. Heeft de trap dus een spanningsversterking van 1.000 en is de waarde van de parasitaire capaciteit gelijk aan 0,5 pF, dan lijkt het voor de schakeling die met de ingang verbonden is alsof er een condensator van 0,5 nF tussen de ingang en de massa is geschakeld! Dat is uiteraard niet zo best als u met de schakeling hoge frequenties wilt verwerken.
Bij de geaarde basis schakeling staat de parasitaire capaciteit C_{bc} tussen de uitgang van de schakeling en de aan de massa liggende basis geschakeld. Er is nu geen sprake van terugkoppeling in tegenfase tussen uitgang en ingang, met als gevolg dat de invloed van deze capaciteit op de werking van de schakeling veel kleiner is.

Een praktische schakeling
In de onderstaande figuur is een praktisch voorbeeldje getekend van een geaarde basis schakeling in de tuner van een FM-ontvanger. De basis wordt door middel van een condensator C4 rechtstreeks met de massa verbonden, zodat aan de basisvoorwaarde van deze schakeling is voldaan. Het ingangssignaal wordt via de condensator C2 van 47 pF afgenomen van de antenne-trafo L1/L2. De belasting bestaat uit een weerstandje R5 van 10 Ω en een afgestemd filtertje C5, C6, L3. Via de condensator C7 van 3,3 pF wordt het versterkte signaal aan de volgende schakeling aangeboden.
Let er op dat de collector via de weerstand R5 en de spoel L3 aan de massa ligt. Om de transistor in te stellen moet de emitter dus aangesloten worden op een negatieve voedingsspanning van -12 V_{dc}.

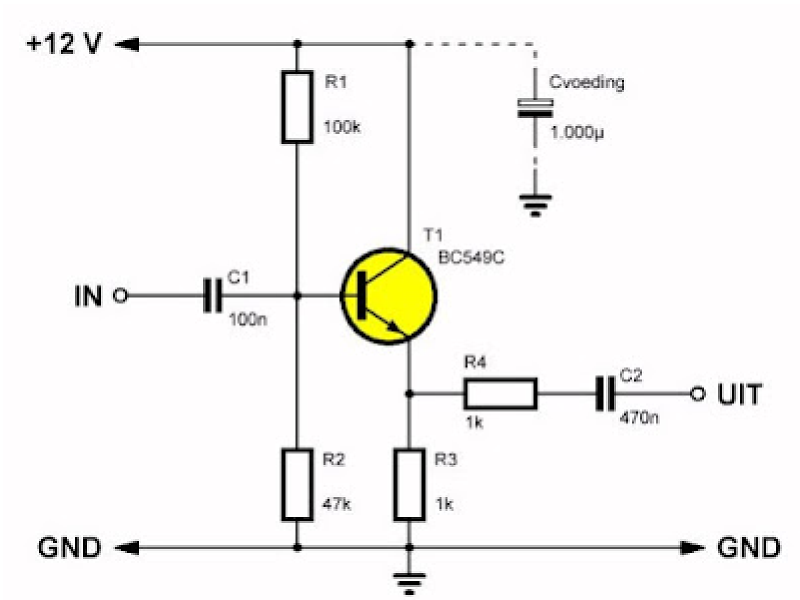


Een praktisch voorbeeld van een geaarde basis schakeling. (© 2019 Jos Verstraten)

De geaarde collector schakeling

Het schema

Het basis schema van de geaarde collector schakeling is getekend in de onderstaande figuur. De collector gaat rechtstreeks naar de voedingsspanning. In de voeding zit de grote afvlakelco $C_{voeding}$ en deze zorgt ervoor dat de collector voor wisselspanningssignalen aan de massa ligt. De basis wordt op de bekende manier ingesteld door middel van de weerstanden R1 en R2. Het ingangssignaal wordt via de scheidingscondensator C1 toegevoerd. In de emitter staat een weerstand R3 geschakeld naar de massa, het uitgangssignaal wordt van de emitter afgenomen. De serieweerstand R4 is niet noodzakelijk, maar beschermt de transistor tegen een te grote belasting. Als deze weerstand niet aanwezig is en u sluit per ongeluk de uitgang kort naar de massa, dan staat de transistor (op signaalniveau bekeken) rechtstreeks geschakeld tussen de voeding en de massa. Het gevolg zou zijn dat de halfgeleider vrij snel zou sneuvelen door een veel te grote signaalstroom.



Het schema van de geaarde collector schakeling. (© 2019 Jos Verstraten)

De bekende emittervolger

De geaarde collector schakeling staat ook bekend onder de naam *'emittervolger'*. Het signaal

op de emitter volgt namelijk het signaal op de basis. Dat wil zeggen dat een van de voornaamste kenmerken van de geaarde collector schakeling is dat de schakeling géén spanningsversterking oplevert! Het signaal op de emitter is een exacte kopie van het ingangssignaal op de basis. De schakeling heeft echter andere zeer nuttige eigenschappen.

Eigenschappen van de geaarde collector schakeling
Een van de voornaamste eigenschappen is dat de ingangsimpedantie zeer groot is. Dit wordt veroorzaakt door een extreme terugkoppeling tussen de emitter en de basis, waardoor de bron zeer weinig wordt belast. Een tweede belangrijke eigenschap is dat de uitgangsimpedantie zeer laag is. Waarden van 50 Ω zijn gemakkelijk te bereiken. De emittervolger is dan ook bij uitstek dé schakeling om buffertrappen samen te stellen. Zo'n buffertrap moet dan een bron die niet te zwaar belast mag worden afsluiten en biedt het uitgangssignaal van de bron aan over een zeer lage uitgangsimpedantie.
De geaarde collector schakeling is, zoals reeds geschreven, géén spanningsversterker. Wat wél wordt versterkt zijn stromen. Vanwege de zeer hoge ingangsimpedantie is de ingangsstroom uiteraard zeer laag. Maar vanwege de lage uitgangsimpedantie kan de schakeling een flinke stroom aan een belasting leveren. De schakeling werkt niet inverterend, zodat het uitgangssignaal op de emitter in fase is met het ingangssignaal op de basis.

Instellen van een bipolaire transistor in de praktijk

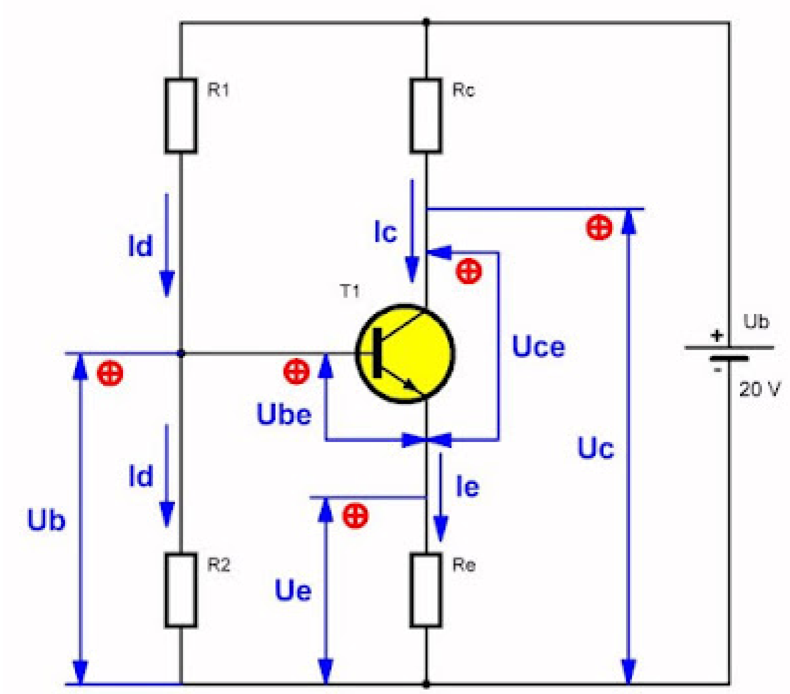
Inleiding
Het instellen van een transistor is op zich geen moeilijke werk. U kunt op twee manieren te werk gaan:

- De 'officiële' manier, berekenen met databoek en rekenmachine.
- De 'cut-and-try' methode, waarbij u zuiver experimenteel te werk gaat.

Berekenen van de instelling
Probleem van deze methode is dat u er wél de transistor karakteristieken voor nodig hebt. Maar gelukkig vindt u deze snel via Google, zodat dit geen probleem is. Als voorbeeld wordt het instellen van een transistortrap in klasse-A en in geaarde emitter schakeling besproken. Het instellen van de andere basisschakelingen en de andere klassen gaat in principe op een vergelijkbare manier. Vergeet echter nooit dat berekeningen aan een transistor altijd zeer benaderend zijn. Transistoren van hetzelfde type hebben namelijk erg grote spreidingen en de karakteristieken die worden gepubliceerd zijn niets meer of minder dan de gemiddelde van een groot aantal transistoren. Individueel kunnen echter afwijkingen van meer dan 25 % optreden!
Het basisschema van het voorbeeld is getekend in de onderstaande figuur. In deze figuur staat:

- U_c voor de rustspanning op de collector.
- U_b voor de rustspanning op de basis.
- U_e voor de rustspanning op de emitter.
- I_c voor de ruststroom door de collector.
- I_b voor de ruststroom door de basis.
- I_e voor de ruststroom door de emitter.
- U_{be} voor de geleidingsspanning van de transistor.
- I_d voor de stroom door de instelweerstanden van de basis.

De geleidingsspanning van een transistor bedraagt voor silicium ongeveer 0,6 V en voor germanium ongeveer 0,2 V. Uit deze wetenschap kunt u dus een verband afleiden tussen U_b en U_e. De emitter rustspanning is steeds 0,6 V of 0,2 V lager dan de rustspanning op de basis, althans bij NPN-transistoren.
De schakeling wordt gevoed uit een gelijkspanning Ub van 20 V.



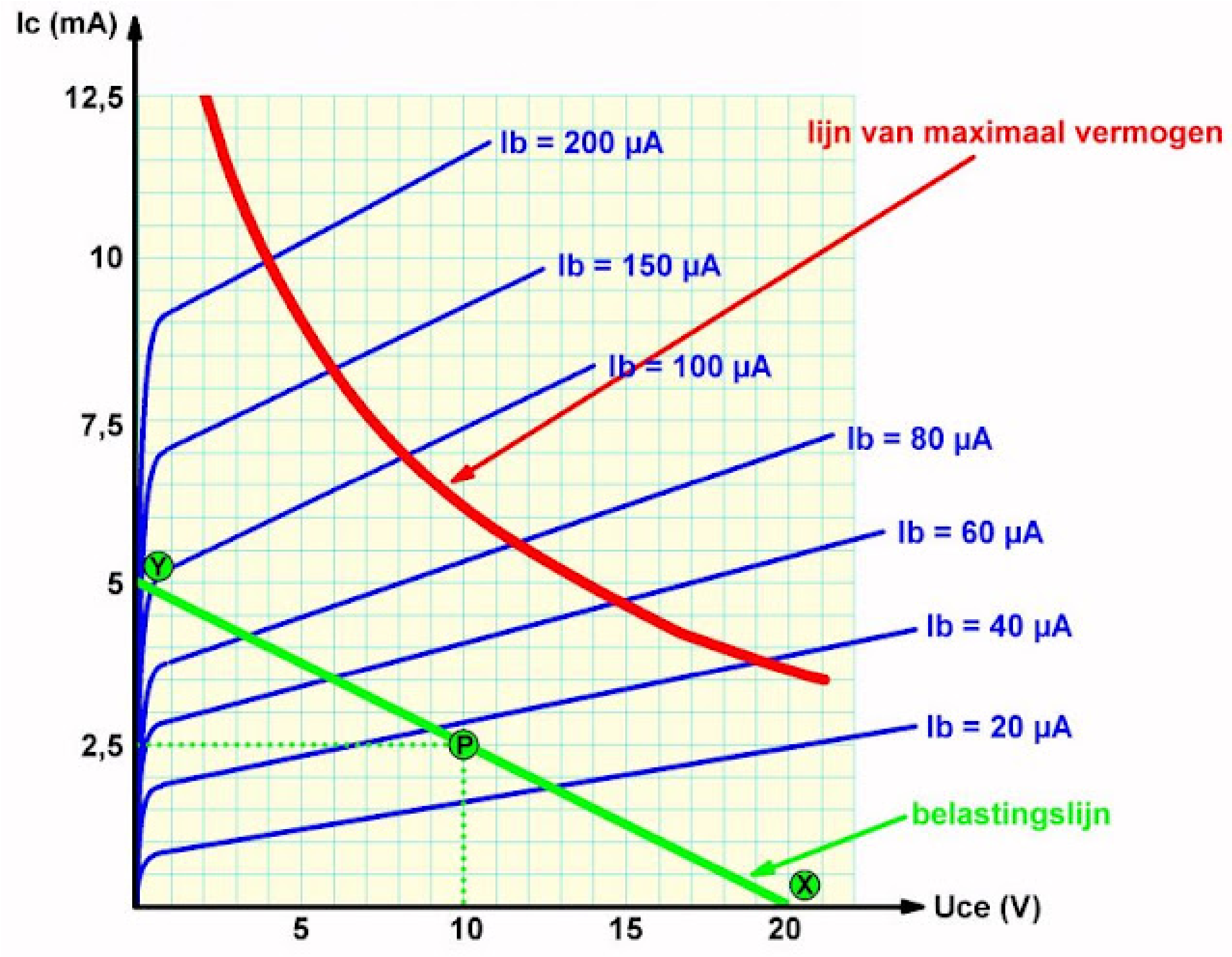
Het schema aan de hand waarvan het berekenen van de instelling van een transistortrap wordt besproken. (© 2019 Jos Verstraten)

Het instelpunt

Het instelpunt, P genoemd, is het belangrijkste gegeven dat u nodig hebt voor het instellen van een transistortrap. Dit punt bepaalt de ruststroom door de transistor en de rustspanning op de uitgang van de schakeling. Als u, zoals in het beschreven voorbeeld, wilt instellen in klasse-A dan zal het duidelijk zijn dat het instelpunt in het midden van het niet-gearceerde deel van de eerder besproken grafiek moet liggen. Dat betekent dat de rustspanning op de collector ongeveer gelijk moet zijn aan de helft van de voedingsspanning. Alleen dan is het mogelijk dat de ruststroom door de transistor even veel kan stijgen als kan dalen zonder in een van de gearceerde gebieden terecht te komen. Als dus een transistortrap wordt aangesloten op een voedingsspanning van 20 V, dan moet de rustspanning U_c in klasse-A op de collector gelijk zijn aan 10 V. Dit doet u door een bepaalde waarde voor de collectorweerstand Rc en de emitterweerstand Re te berekenen.

De belastingslijn

De belastingslijn geeft het verband tussen de collectorstroom I_c en de collector/emitter-spanning U_{ce} van een transistor voor een bepaalde waarde van de weerstanden in collector en emitter. Nu zeggen de begrippen I_c en U_{ce} wel iets. Die vormen namelijk de assen van de uitgangskarakteristiek $I_c = f(U_{ce})$ van een transistor. Spreek uit: '*I_c in functie van U_{ce}*'. In deze karakteristiek wordt het verband gegeven tussen de U_{ce} en de I_c voor diverse waarden van de basisstroom I_b (blauwe lijnen). Voor het tekenen van de belastingslijn moet u dan ook deze karakteristiek bij de hand hebben. In de onderstaande figuur is een belastingslijn (groen) getekend op een geïdealiseerde $I_c = f(U_{ce})$-karakteristiek van een transistor.



De belastingslijn ingetekend in een $I_c = f(U_{ce})$ karakteristiek van een transistor.
(© 2019 Jos Verstraten)

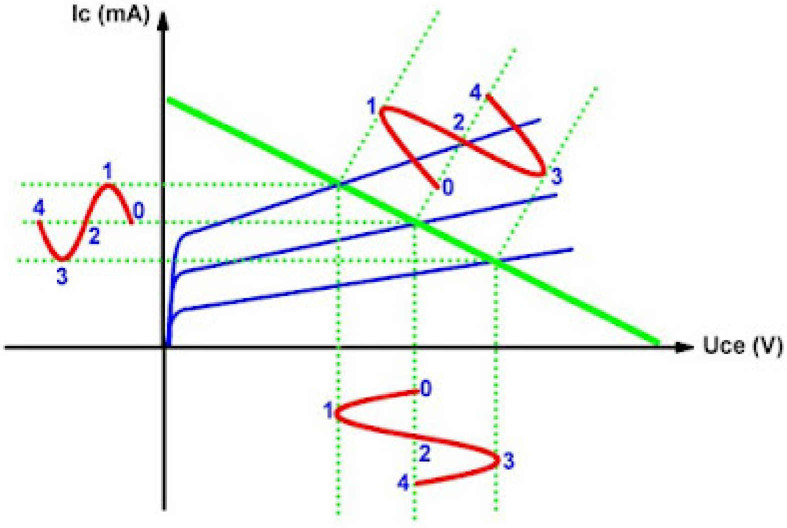
Hoe wordt deze belastingslijn bepaald?
Het instelpunt P moet in ieder geval op de verticale lijn liggen die overeen komt met een U_{ce} van 10 V. Vervolgens moet u een ruststroom I_c kiezen, waarbij u er voor moet zorgen dat u ver beneden *'de lijn van maximaal vermogen'* blijft. Deze lijn (rood) is in de meeste $I_c = f(U_{ce})$-karakteristieken ingetekend door de fabrikant van de transistor. In dit voorbeeld wordt gekozen voor een rustwaarde van de collectorstroom van 2,5 mA. Op dit moment is het instelpunt P volledig bepaald. Dit punt ligt immers op het snijpunt van de verticale lijn bij U_{ce} gelijk aan 10 V en de horizontale lijn bij I_c gelijk aan 2,5 mA.
Dit punt P ligt in ieder geval op de belastingslijn. Maar een tweede punt dat op de lijn moet liggen is ook bekend. Als namelijk de collectorstroom nul zou zijn, dan is het duidelijk dat in het voorbeeld de collector/emitter-spanning gelijk is aan de voedingsspanning, dus 20 V. Op deze manier kunt u het punt X van de belastingslijn bepalen. U verbindt vervolgens de punten P en X met een rechte lijn en laat deze doorlopen tot de verticale as. De belastingslijn snijdt deze as in het punt Y. Hieruit kunt u aflezen dat de collectorstroom gelijk is aan 5 mA als er geen spanning tussen de collector en de emitter staat.
Als met Uce = 0 V een stroom van 5 mA door de keten vloeit en de voedingsspanning is 20 V, dan volgt hieruit automatisch dat de som van de drie weerstanden Re, Rc en Rce gelijk moet zijn aan 4 kΩ. Omdat Rce in dit geval nul is (er valt immers geen spanning over (U_{ce} = 0 V) moet de som van Re en Rc gelijk zijn aan 4 kΩ. Met de wet van Ohm (spanning van 20 V delen door stroom van 5 mA) kunt u berekenen dat de somwaarde van deze weerstanden gelijk moet zijn aan 4 kΩ.

Berekenen van de weerstanden
Voor het berekenen van de twee weerstanden moeten wij van punt Y terug naar punt P. Een vuistregel stelt dat de rustspanning op de emitter ongeveer gelijk moet zijn aan één tiende van de voedingsspanning. In het voorbeeld komt dit dus overeen met een spanning van 2 V.

De ruststroom I_e is onbekend maar kan vanwege de grote stroomversterking van de transistor gelijk gesteld worden aan de ruststroom door de collector, in dit geval 2,5 mA.
U kunt dan de waarde van de emitterweerstand berekenen: 2 V gedeeld door 2,5 mA levert een waarde op van 800 Ω. Meteen weet u dan de waarde van de collectorweerstand: 4 kΩ - 0,8 kΩ is gelijk aan 3,2 kΩ. Over deze weerstand valt 8 V. Over de Rce valt in dit geval dus 10,0 V. Deze dynamische weerstand is dus in het punt P gelijk aan 4 kΩ. De collector staat op 12 V.
Door deze keuze van de weerstandswaarden zal het instelpunt weliswaar iets naar links verschuiven, maar dat is geen ramp. Berekeningen zijn immers zeer benaderend!

De instelling van de basis
Uit de $I_c = f(U_{ce})$-karakteristiek kunt u aflezen dat het instelpunt P ongeveer op de lijn ligt die overeen komt met een basisstroom van 40 μA. Maak dan een schatting van de basisstroom op punt P, in dit geval zal 35 μA er niet ver naast liggen. Dit wordt dus de rustwaarde I_b van de basisstroom. Deze basisstroom wordt geleverd door de weerstanden R1 en R2. Een tweede vuistregel stelt dat u er voor moet zorgen dat de stroom I_d door deze weerstanden ongeveer tien keer groter is dan de ruststroom naar de basis.
Door de twee weerstanden moet dus een stroom I_d van 350 μA vloeien. De weerstanden staan in serie over de voedingsspanning, zodat u de seriewaarde met de wet van Ohm kunt berekenen: 20 V gedeeld door 350 μA levert een waarde op van 57 kΩ. Het komt er nu alleen nog op aan de verhouding tussen beide weerstanden te bepalen. De emitterspanning is bekend, namelijk 2 V. Verder is bekend dat de geleidingsspanning van de Si-transistor gelijk is aan 0,6 V. De basis moet dus op een rustspanning U_b staan van 2,6 V. Dat is meteen ook de spanning die over de weerstand R2 staat. U weet nu de spanning die over de weerstand staat (2,6 V) en de stroom die er doorheen vloeit (350 μA). Met de wet van Ohm berekent u de waarde van de weerstand. 2,6 V gedeeld door 350 μA is gelijk aan 7,4 kΩ. Uiteraard is nu ook de laatste weerstand R1 gemakkelijk te bepalen: 50 kΩ minus 7,4 kΩ is gelijk aan 42,6 kΩ.
De gelijkspanningsinstelling van de transistortrap is hiermee volledig bepaald.

De laatste berekeningen
De stroomversterking voor gelijkspanning van de schakeling laat zich gemakkelijk berekenen. U kent immers de rustwaarden van de basisstroom en van de collectorstromen: 35 μA en 2,5 mA. De verhouding tussen beide waarden geeft de gelijkstroomversterking van de trap: 71,4. De versterking voor wisselstroom zal veel groter zijn als u de emitterweerstand overbrugt met een grote condensator. In de $I_c = f(U_{ce})$ grafiek kunt u intekenen wat er gebeurt als u de basisstroom symmetrisch laat variëren rond de instelwaarde van 35 μA, bijvoorbeeld van 15 μA tot 55 μA. Dit gebeurt als er op de basis via een scheidingscondensator en een serieweerstand een wisselspanningssignaal wordt aangeboden.



Het moduleren van de rustwaarde van de basisstroom door het ingangssignaal en de gevolgen voor de collectorspanning en -stroom. (© 2019 Jos Verstraten)

Het werkpunt gaat dan als het ware over de belastingslijn heen en weer schuiven. Dit is voorgesteld in de bovenstaande figuur. De collectorspanning en -stroom worden dan ook gemoduleerd, waardoor de stroom- en spanningsversterking van de trap meteen duidelijk wordt. Als de basisstroom stijgt van punt 0 naar punt 1, dan zal de U_{ce} dalen van punt 0 naar punt 1 en de I_c stijgen van punt 0 naar punt 1.
Uit de $I_c = f(U_{ce})$-karakteristieken kunt u afleiden dat bij de genoemde basismodulatie de collectorstroom zal variëren tussen 3,75 mA en 1,25 mA en dat de collector/emitter-spanning zal variëren tussen 5 V en 15 V. De top tot top waarde van het versterkte uitgangssignaal is dus gelijk aan 10 V. Het volstaat de basissturing zo te berekenen dat de maximale positieve en negatieve afwijkingen van de ruststroom niet groter zijn dan de gestelde 20 µA. Dat kan bijvoorbeeld door tussen de voorgaande trap en de ingang van de schakeling een serieweerstand op te nemen. De waarde kunt u natuurlijk weer met de wet van Ohm berekenen.